



# 加速腐蚀环境下钢板表面坑蚀形貌统计规律

王皓, 徐善华, 苏磊

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

**摘要:**采用光学表面测量技术对实验室加速腐蚀钢板试件进行坑蚀表面数据采集,通过建立不同龄期的锈蚀钢板表面形貌图讨论了锈蚀钢板表面点蚀特征随腐蚀时间的变化趋势。对于以局部腐蚀为主的锈蚀钢板,通过计算证明坑蚀平均深度近似等于腐蚀平均深度,且其随时间的变化趋势可以采用新型 weibull 函数加以描述。经过对垂直于钢板受力方向的坑蚀截面损失率进行探究,指出可以利用正态分布模型表征其随机分布规律,并建立了模型参数与坑蚀平均深度之间关系式。最后讨论了与腐蚀时间相关的钢板屈服强度退化概率模型。

**关键词:**锈蚀钢板;形貌图;坑蚀平均深度;坑蚀截面损失率

**中图分类号:**TU391 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)01-0023-07

## Statistical regularity of surface pitting morphology of steel in accelerated corrosion environment

Wang Hao, Xu Shanhua, Su Lei

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

**Abstract:** We used the optical surface measurement technology to collect the pitting surface data of steel plate specimens subjected to laboratory accelerated corrosion, and discussed on trends of pitting characteristics with the increase of corrosion time by establishing 3D contour pictures of surface data of corroded steel with different corrosion time. For the corroded steel plate mainly with local corrosion, calculations showed that the average depth of pitting corrosion was approximately equal to the average depth of corrosion, and the tendency of the average depth of pitting corrosion with time could be described by a new Weibull function. The pitting section loss ratio, which was perpendicular to the force direction of steel plate, showed a normal distribution, and the relationship between the model parameters and the average depth of pitting corrosion was established. The probabilistic yield strength deterioration model relating to the corrosion ratio was discussed.

**Keywords:** corrosion of steel; contour pictures; average pitting depth; pitting section loss ratio

随着钢产量的增加与钢结构设计理论的日益成熟,中国钢结构工程的数量和规模逐年增加。然而

钢结构耐久性差,长期处于海洋、工业大气等腐蚀环境下的钢结构工程极易出现腐蚀问题。钢结构腐蚀

**收稿日期:**2015-08-25

**基金项目:**国家自然科学基金(51378417)

**作者简介:**王皓(1988-),男,博士生,主要从事工程结构耐久性研究,(E-mail) wh19881218@126.com。

**Received:**2015-08-25

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51378417)

**Author brief:** Wang Hao(1988-), doctoral candidate, main research interest: durability of engineering structures, (E-mail) wh19881218@126.com.

导致钢材在环境作用下发生损坏和性能下降,其腐蚀具有破坏性,致使建筑物承载力衰退,甚至还会引发倒塌而造成生命财产的巨大损失,因此,如何对钢结构腐蚀构件进行安全性评估已成为各国学者研究的一个重要课题,其中锈蚀钢材的腐蚀退化规律是最为基础而关键的问题之一。

目前,国内外学者对于锈蚀钢材的腐蚀退化规律方面已有较多研究,在对钢筋锈蚀程度表征上,通常使用的指标是锈蚀质量损失率<sup>[1-3]</sup>,但锈蚀质量损失率却并未考虑钢筋腐蚀形貌与蚀坑程度等特征,范颖芳等<sup>[4]</sup>研究了锈蚀钢筋蚀坑几何参数对钢筋力学性能的敏感性,认为最大蚀坑深度是影响力学性能的主要因素,且认为最大蚀坑深度服从极值分布;王波等<sup>[5]</sup>则分析探讨了坑蚀三维尺寸对钢筋名义屈服强度的影响规律;徐亦冬等<sup>[6]</sup>则对锈蚀钢筋表面轮廓进行统计分析,认为锈蚀钢筋表面轮廓直径符合正态分布,且具有统计分形的特征。在船舶钢铁腐蚀研究领域,Melchers<sup>[7-8]</sup>通过对多种碳钢、低合金钢进行实海观测试验,分析了试件最大点蚀深度及平均点蚀深度的具体时变进程,提出了点蚀现象学模型;Paik 等<sup>[9-10]</sup>认为在评估结构强度时,相对点蚀坑深而言,点蚀所造成的截面积损失是更值得关注的指标;王燕舞等<sup>[11]</sup>则针对中国船舶结构常用碳钢、低合金钢的实海腐蚀试验观测数据建立了新型 Weibull 函数形式的点蚀最大深度时变模型。对于老旧钢结构桥梁,Appuhamy 等<sup>[12]</sup>在自然锈蚀钢板拉伸试验的基础上探讨了钢板残余厚度对其屈服及极限强度的影响,并提出了钢板有效残余厚度的概念。

本文针对以上观点,采用光学表面测量技术对实验室加速腐蚀钢板试件进行坑蚀表面数据采集,绘制了不同腐蚀龄期锈蚀表面形貌图,对点蚀坑随时间的变化规律进行了阐述。深入研究了锈蚀钢板坑蚀平均深度随腐蚀时间的变化规律;探讨了锈蚀钢板坑蚀截面损失率与坑蚀平均深度之间的相关性,为考虑坑蚀影响的锈蚀钢材力学性能退化研究开展前期工作。

## 1 试验方案

### 1.1 加速腐蚀试验

本试验采用 YWX/Q-020 型盐雾箱进行海洋大气环境腐蚀试验,试验溶液采用质量百分比 5% 的氯化钠溶液,设定盐雾箱温度为 35 ℃,饱和器温度

为 37 ℃,相对湿度大于 95%,进气压力为 0.2~0.3 MPa,压缩空气压力为 0.07~0.17 MPa,喷雾量为 1.0~2.0 ml/80 cm<sup>2</sup>·h,pH 值为 6.5~7.2。

将 10 组(每组 2 块)板材试样与垂直方向成 30° 放置箱体内部,板材尺寸为 280 mm×50 mm×8 mm。采用间隙喷雾法进行腐蚀,具体喷洒制度为喷 6 h,停 6 h。腐蚀周期分别为 14 d 8 轮、20 d 2 轮、40 d 1 轮,每个腐蚀周期从盐雾箱中取出一组试件进行除锈、烘干并称重,计算锈蚀质量损失率,直至试验结束,试验总周期为 178 d。

### 1.2 坑蚀表面数据采集试验

运用 PS50 三维非接触式表面形貌仪对编号为 A01~A91 及 A02~A92 锈蚀钢板试件表面进行测量。对于每块锈蚀钢板试件,随机选择钢板一侧两个不相邻区域进行测试,每个区域面积大小为 30 mm×30 mm,测量步长沿试件宽度方向为 18 μm,沿试件长度方向为 220 μm,从测试数据中选取坑蚀表面 XYZ 三维坐标值进行后续概率统计分析。图 1 为 PS50 三维非接触式表面形貌仪示意图。

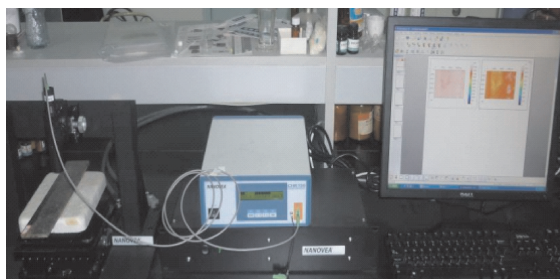


图 1 PS50 形貌仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PS50 profilometer

### 1.3 锈蚀表面形貌分析

本文根据表面形貌扫描数据,运用 surfer8.0 软件分别绘制了试件 A01、A81 测量区域的锈蚀表面形貌图,如图 2 所示,当锈蚀程度相对较低时,测量区域内的点蚀坑密度较大,而直径相对于深度较小,属于窄深型蚀坑;随着锈蚀程度的增大,点蚀密度逐渐减小,而蚀坑的三维尺寸逐渐增大,锈蚀钢板表面逐渐生成宏观局部腐蚀。以上结论与实际腐蚀过程比较吻合,说明表面形貌采集数据具有一定的实用性、准确性。然而,相对于较大面积的钢板表面,单个点蚀坑对钢板横截面积的损伤程度有限,因此本研究并未单独对点蚀坑几何尺寸的分布规律进行统计,而是对粗糙不平的锈蚀表面数据进行整体分析。

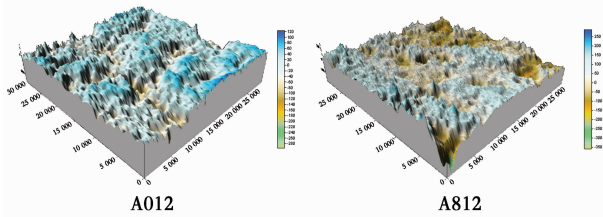


图2 锈蚀表面形貌图

Fig. 2 Contour picture of corroded surface

## 2 试验结果分析

### 2.1 坑蚀平均深度时变模型

对于既有钢结构建筑,采用锈蚀质量损失率来评定其锈蚀程度显然是不可行的。由于本试验所采用的腐蚀环境为模拟海洋大气加速腐蚀环境,锈蚀钢板呈现出局部坑蚀的腐蚀特征,因此,采用局部坑蚀体积换算所得的相对局部坑蚀平均深度作为评定试验试件锈蚀程度的等效腐蚀量。相对局部坑蚀平均深度的换算公式为:

$$d = \frac{1}{A_w} \iint_D |z(x, y) - z_{top}| dx dy \approx \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |z(x_i, y_j) - z_{top}| \quad (1)$$

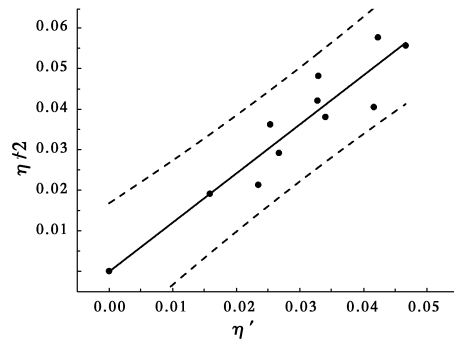
$$\eta' = \frac{d}{t_0} = \frac{\sum_{i=1}^4 d_i}{4t_0} \quad (2)$$

式中: $d$ 为各测量区域局部坑蚀平均深度, $M, N$ 为测量区域内 $X, Y$ 方向测量步长数, $z(x_i, y_j)$ 为测点垂直方向坐标值, $z_{top}$ 为测量范围内纵坐标最高点值, $\eta'$ 为相对局部坑蚀平均深度, $d$ 为任一腐蚀龄期钢板的坑蚀平均深度(由于锈蚀钢板试件各测量区域坑蚀深度离散性较大,因此,采用各腐蚀阶段4个

测量区域的局部坑蚀平均深度均值作为各腐蚀龄期坑蚀平均深度)。  $t_0$  则为未锈蚀钢板厚度,均为 8 mm。

为了验证相对局部坑蚀平均深度作为等效腐蚀量的有效性,将上述公式(2)所计算的各腐蚀阶段相对局部平均坑蚀深度与各阶段平均质量损失率(单侧)进行对比,建立相对坑蚀深度与质量损失率关系图3。(图中各数据点坐标值详见表1)

采用最小二乘法对图中数据点进行线性拟合,相关系数  $R^2$  为 0.878,拟合直线斜率为 1.211,说明在锈蚀质量损失率不超过 10%时,可以采用各腐蚀阶段相对坑蚀平均深度  $\eta'$  近似代替锈蚀钢板单侧质量损失率,来有效表征钢板在腐蚀环境下的锈蚀程度。但是随着锈蚀时间的逐渐增长,局部坑蚀面积逐渐扩大,测量区域内钢板原表面被完全侵蚀,即形成了一定程度上的层状剥离侵蚀,导致相对坑蚀平均深度与质量损失率之间的误差越来越大,此时采用相对坑蚀平均深度  $\eta'$  作为等效腐蚀量已不再准确,应将剥离侵蚀产生的均匀腐蚀深度与坑蚀平均深度共同考虑,作为等效腐蚀量的参考指标。



注:—拟合曲线 ---95%保证率

图3 相对坑蚀平均深度与质量损失率关系

Fig. 3 Relationship between the relative average depth of pit corrosion and mass loss rate

表1 测量区域坑蚀平均深度

Table 1 Average pitting depth in measurement area

腐蚀时间/d	测试区域 11	测试区域 12	测试区域 21	测试区域 22	$\bar{d}$ /mm	$\eta'$	$\eta/2$
	$d$ /mm	$d$ /mm	$d$ /mm	$d$ /mm			
14	0.143	0.125	0.119	0.121	0.127	0.015 84	0.019 1
28	0.132	0.213	0.147	0.259	0.188	0.023 47	0.021 3
42	0.214	0.214	0.194	0.233	0.214	0.026 72	0.029 2
56	0.199	0.201	0.163	0.248	0.203	0.025 34	0.036 2
70	0.275	0.286	0.241	0.287	0.272	0.034 03	0.038 1
84	0.198	0.275	0.379	0.197	0.262	0.032 78	0.042 1
98	0.343	0.512	0.227	0.251	0.333	0.041 66	0.040 5
118	0.281	0.321	0.218	0.233	0.263	0.032 91	0.048 2
138	0.361	0.329	0.306	0.497	0.373	0.046 66	0.055 7
178	0.277	0.277	0.313	0.486	0.338	0.042 28	0.057 7

局部坑蚀平均深度作为一定锈蚀程度范围内等效腐蚀量的重要参数之一,应对其随时间的变化趋势进行预测。文献[13]认为钢的大气腐蚀发展遵循幂函数规律:  $d(T) = AT^n$ ,  $D$  为腐蚀深度,  $T$  为暴露时间,  $A$  为第一年的腐蚀速率,  $n$  表示腐蚀的发展趋势; Paik 等[14]通过统计 44 条散货船的 7 503 个纵向构件的腐蚀数据点信息,得到腐蚀深度线性模型:  $d(T) = c_1 T$ ,  $c_1$  为腐蚀速率;王燕舞等[11]则根据以往试验结果提出了一种基于新型 weibull 函数的腐蚀深度时变模型,模型的具体函数表达式为  $d(T) = d_m \{1 - \exp[-(T/\alpha)^m]\}$ ,其中  $d_m$  的物理意义为点蚀深度上限,  $\alpha$  和  $m$  为形状参数和尺度参数。根据以上各种观点,采用 3 种模型函数对局部坑蚀平均深度的时变数据点进行拟合分析,具体结果见图 4。

根据图中 3 种函数相关系数的大小关系可知,新型 weibull 函数的拟合情况最好,说明在实验室加速腐蚀环境下,新型 weibull 函数可以更好地对抗蚀深度随时间的变化趋势进行预测,因此,采用新型 weibull 函数作为坑蚀深度随时间变化的时变模型,模型参数的具体取值:  $d_m = 499.38$ ,  $\alpha = 122.49$ ,  $m = 0.563$ 。但是由于该时变模型只针对试验室加速腐蚀环境,对于自然环境中坑蚀平均深度随时间的发展规律,还应采用实际结构所得数据进行验证比较,从而更好地对实际服役结构的锈蚀程度进行预测。

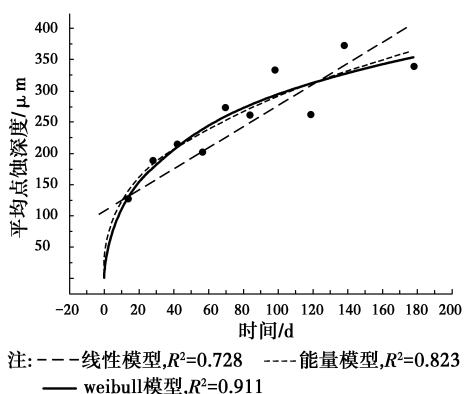


图 4 坑蚀平均深度时变拟合曲线

Fig. 4 Time-varying fitting curve of average pitting depth

## 2.2 坑蚀横截面积分布规律

钢板在大气腐蚀环境中发生锈蚀后,其锈蚀表面各项几何参数指标均有可能对钢材的力学性能退化产生影响,单纯注重点蚀深度指标的做法被认为

是较为粗糙的,应针对构件实际受力情况选定主要影响参数进行深入细致分析。Paik 等[9-10]认为在评估结构强度时,相对点蚀坑深而言,点蚀所造成的截面积损失是更值得关注的指标;安琳等[15]则通过钢筋拉伸试验结果证明锈蚀钢筋与未锈钢筋的名义强度比可近似取锈后钢筋的最大残余面积率,受锈坑应力集中的影响甚微。基于以上学者观点,通过锈蚀钢板表面三维尺寸的测量,对锈蚀钢板的坑蚀截面损失率随机分布进行概率统计分析是十分必要的。

Mohammad 等[16]通过对锈蚀钢筋模型数据的统计分析,指出延锈蚀钢筋长度方向的横截面积随机分布服从对数正态分布模型,并建立了模型参数与锈蚀质量损失率之间的关系式。对于锈蚀钢构件而言,由于测量区域范围限制,在实际工程中无法对其锈蚀质量损失率进行评测,因此,采用锈蚀质量损失率对模型参数进行计算是不尽合理的。在本文 2.1 节中,已经对抗蚀平均深度进行了分析,发现将其作为等效腐蚀量的参考指标具有一定的实际意义,故选择坑蚀平均深度作为对抗蚀截面损失率随机分布进行探究的基础。

为了探究坑蚀截面损失率服从何种分布,需要设定以下参数及转换公式:

坑蚀面积系数

$$\beta(x) = \frac{A(x)/A_0}{A/A_0} = \frac{d(x)/t_0}{d/t_0} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |z(x, y_j) - z_{top}|}{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |z(x_i, y_j) - z_{top}|} \quad (3)$$

式中:  $d(x)$  为延试件长度方向坐标值为  $x$  的截面坑蚀平均深度,  $d$  为测量区域坑蚀平均深度。

分别采用正态分布和对数正态分布函数对抗蚀面积系数随机分布进行拟合,采用公式标准化转换方式,正态分布函数

$$y = \varphi^{-1}(P) = \frac{\beta(x) - \mu}{\sigma} = a_1 + b_1 \cdot \beta(x) \quad (4);$$

对数正态分布:

$$y = \varphi^{-1}(P) = \frac{\ln[\beta(x)] - \mu}{\sigma} = a_1 + b_1 \cdot \ln[\beta(x)] \quad (5)$$

其中:  $\mu_\beta = -a_1/b_1$ ,  $\sigma_\beta = 1/b_1$ 。

概率运用顺序排列的方法进行计算

$$P = \frac{i}{1+n}, i = 1, \dots, n \quad (6)$$

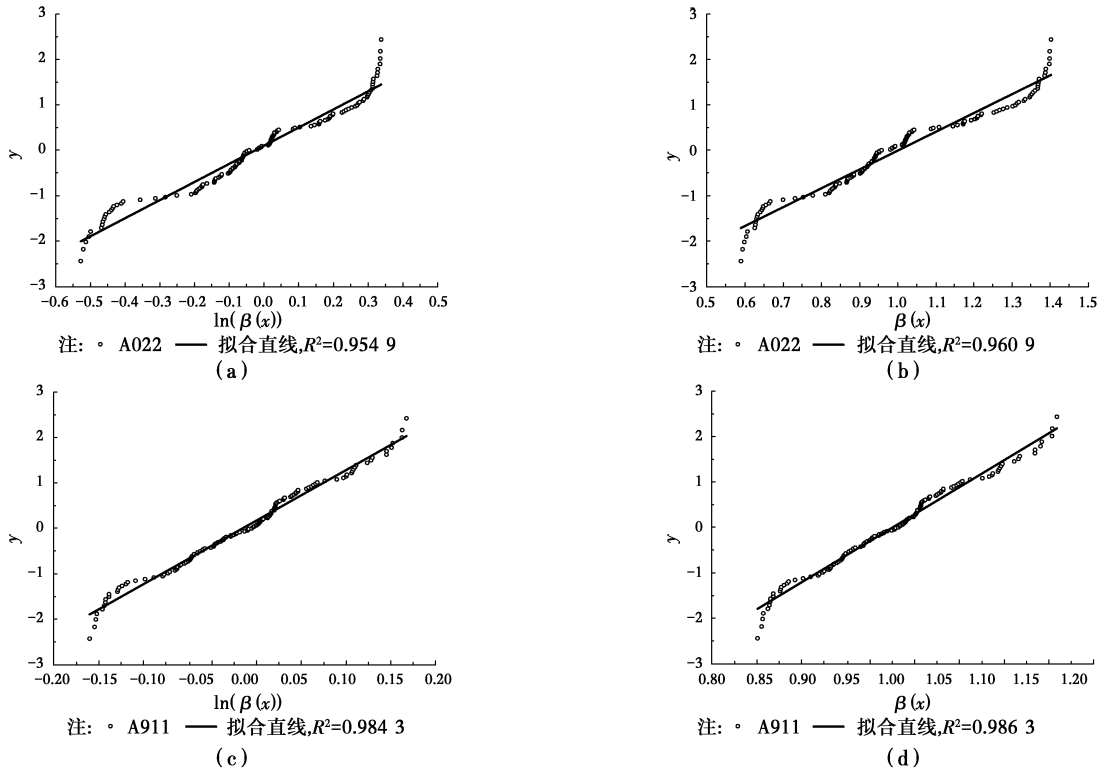


图 5 坑蚀面积系数分布规律

Fig. 5 Distribution law of pit corrosion area coefficient

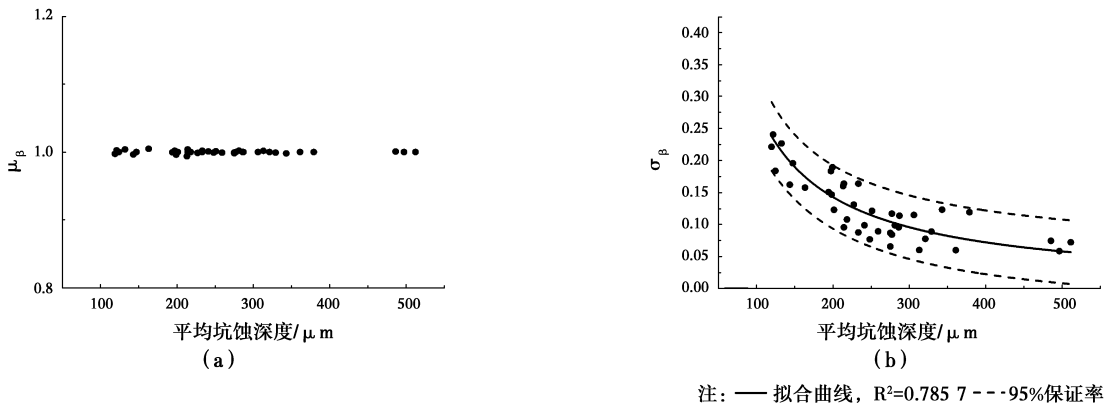


图 6 模型参数随坑蚀平均深度变化趋势图

Fig. 6 Trend of model parameter with average pitting depth

通过图 5 中(a)与(b)及(c)与(d)的拟合相关系数比较发现,采用正态分布函数对坑蚀面积系数随机分布进行描述更为准确。将线性拟合所得参数带入公式(5),计算  $\mu_\beta$  和  $\sigma_\beta$ , 然后建立  $\mu_\beta$  及  $\sigma_\beta$  随坑蚀平均深度的变化趋势图 6。从图中可以看出,  $\mu_\beta$  基本不随坑蚀平均深度的变化而变化,  $\mu_\beta \approx 1$ ;  $\sigma_\beta$  随坑蚀平均深度的变化呈幂函数下降趋势(公式(7)), 说明随着锈蚀程度的增大,测量区域内垂直于试件受力方向坑蚀横截面损失率之间的离散性逐渐减

小,基本符合随着锈蚀时间的增长,锈蚀试件点蚀坑逐渐向四周扩散形成局部蚀坑的腐蚀规律。根据以上参数及公式,我们便可以在已知腐蚀龄期的情况下对最大坑蚀截面损失率(单侧)进行保证率为 95% 的概率预测,从而对腐蚀后钢板的强度进行有效折减,建立锈蚀钢板的屈服强度退化概率模型。公式(7)、(8)、(9)的具体函数计算表达式为

$$\sigma_\beta = 26.54d^{-0.987} \quad (7)$$

$$\gamma_{(0.95)} =$$

$$\frac{A_{(0.95)}}{A_0} = \frac{d_{(0.95)}}{t_0} = \frac{\varphi^{-1}(0.95) \cdot \beta + \mu}{t_0} \cdot d(T) = \frac{\varphi^{-1}(0.95) \cdot 26.54d(T)^{-0.987} + 1}{t_0} \cdot d(T) = \frac{\varphi^{-1}(0.95) \cdot 26.54\{d_m\{1 - \exp[-(T/\alpha)^m]\}\}^{-0.987} + 1}{t_0} \cdot d_m\{1 - \exp[-(T/\alpha)^m]\} \quad (8)$$

式中： $\gamma_{(0.95)}$  为保证率为 95% 的单侧面损失率。

屈服强度退化概率模型：

$$f'_y = (1 - 2\gamma_{0.95})f_y \quad (9)$$

为了验证上述计算公式的准确性，分别计算不同龄期锈蚀钢板的最大锈损截面面积率，并与课题组随后进行的力学性能试验数据进行对比，发现最大锈损截面面积率  $(1 - 2\gamma_{(0.95)})$  与对应的相对剩余屈服强度  $(f'_y/f_y)$  之间最大误差仅为 2.13%，符合文献<sup>[1,15]</sup>的相关结论，具体对比数据如表 2 所示。

表 2 最大锈损截面面积率与相对剩余屈服强度对比关系

Table 2 contrast relationship between maximum corrosion damage section area ratio and relative surplus yield strength

时间/d	$f'_y/f_y$	$1 - 2\gamma_{(0.95)}$	误差/%
14	0.958 7	0.956 5	-2.34
28	0.933 9	0.944 2	1.11
42	0.916 1	0.935 6	2.13
56	0.937 1	0.929 0	-0.86
70	0.934 2	0.926 3	-1.14
84	0.914 0	0.919 0	0.55
98	0.903 2	0.915 1	1.32
118	0.907 5	0.910 3	0.31
138	0.896 6	0.906 2	1.07
178	0.906 4	0.899 7	-0.74

### 3 结 论

1) 通过建立不同龄期锈蚀钢板表面形貌图可以发现，当锈蚀程度相对较低时，测量区域内的点蚀坑密度较大，而直径相对于深度较小，属于窄深型蚀坑；随着锈蚀程度的增大，点蚀密度逐渐减小，而蚀坑的三维尺寸逐渐增大，锈蚀钢板表面逐渐生成宏观局部腐蚀。

2) 局部腐蚀为主的锈蚀钢板，坑蚀平均深度是等效腐蚀量的主要参考指标之一。当腐蚀时间相同时，通过计算证明坑蚀平均深度近似等于腐蚀平均深度，且其随时间的变化趋势可以采用新型 weibull 函数加以描述，该时变模型为自然环境下钢板的坑

蚀平均深度预测提供了借鉴。

3) 锈蚀钢板表面形貌扫描数据的统计结果表明，正态分布函数模型可以对基于坑蚀平均深度的锈蚀钢板单侧横截面积损失率随机分布规律进行较为准确的描述；通过对正态分布模型相关参数进行回归分析，讨论了均值及标准差随坑蚀平均深度的变化规律，并据此建立了与坑蚀平均深度相关的锈蚀钢板单侧横截面积损失率的概率模型。

4) 从几个方面对加速腐蚀环境下钢板表面坑蚀几何形貌规律进行了统计分析，为后续研究锈蚀钢板表面坑蚀三维几何尺寸对力学性能影响提供了参考。

### 参考文献：

[1] Almusallam A A. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars[J]. Construction and Building Material, 2001, 15(8): 361-368.

[2] Du Y G, Clark L A, Chan A H C. Residual capacity of corroded reinforcing bars[J]. Magazine of Concrete Research, 2005, 57(3): 135-147.

[3] 张伟平, 商登峰, 顾祥林. 锈蚀钢筋应力-应变关系研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(5): 586-592.

Zhang W P, Shang D F, Gu X L. Stress-strain relationship of corroded steel bars[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(5): 586-592. (in Chinese)

[4] 范颖芳, 张英姿, 胡志强, 等. 基于概率分析的锈蚀钢筋力学性能研究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(1): 99-104.

Fan Y F, Zhang Y Z, Hu Z Q, et al. Study on mechanical property of rusty rebar based on probability analysis[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(1): 99-104. (in Chinese)

[5] 王波, 袁迎曙, 李富民, 等. 氯盐锈蚀钢筋的屈服强度退化分析及其概率模型[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(5): 597-603.

Wang B, Yuan Y S, Li F M, et al. Deterioration analysis of yield strength and its probabilistic model of steel bar corroded by chloride[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(5): 597-603. (in Chinese)

[6] 徐亦冬, 钱春香, 边力, 等. 非均匀锈蚀钢筋表面轮廓的分形表征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(2): 296-303.

Xu Y D, Qian C X, Bian L, et al. Fractal based characterization of nonuniform corroded surface profile

- in steel bars [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(2): 296-303. (in Chinese)
- [7] Melchers R E. Pitting corrosion of mild steel in marine immersion environment-Part 1: Maximum pit depth [J]. Corrosion, 2004, 60(9):824-836.
- [8] Melchers R E. Pitting corrosion of mild steel in marine immersion environment-Part 2: Variability of maximum pit depth[J]. Corrosion, 2004, 60(10):937-944.
- [9] Paik J K. Ultimate strength of ships - time-variant risk assessment of aging ship staking account of general/pit corrosion, fatigue cracking and local dent damage. [R]. Technical Report RD 2002-11, American Bureau of Shipping, 2002.
- [10] Paik J K, Wang G, Thayamballi A K, Lee J M. Time-dependent risk assessment of aging ships accounting for general/pit corrosion, fatigue cracking and local denting [J]. SNAME Trans, 2003(2):111-115.
- [11] 王燕舞, 黄小平, 崔维成. 船舶结构钢海洋环境点蚀模型研究之一:最大点蚀深度时变模型[J]. 船舶力学, 2007, 11(4):577-586.
- Wang Y W, Huang X P, Cui W C. Pitting corrosion model of mild and low-alloy steel in Marine environment-Part 1: Maximum pit depth[J]. Journal Of Ship Mechanics, 2007, 11(1): 65-79. (in Chinese)
- [12] Appuhamy J M R S, Kaita T, Ohga M, et al. Prediction of residual strength of corroded tensile steel plates [J]. International Journal of Steel Structures, 2011, 11(1):65-79.
- [13] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京:化学工业出版社, 2006 :34-35.
- Cao C N. Natural environmental corrosion of China materials[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2006. 34-35.
- [14] Paik J K, Kim S K, Lee S K. Probabilistic corrosion rate estimation model for longitudinal strength members of bulk carriers[J]. Ocean Engineering, 1998, 25(10): 837-860.
- [15] 安琳, 欧阳平, 郑亚明. 锈坑应力集中对钢筋力学性能的影响[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2005, 35(6): 940-944.
- An L, Ouyang P, Zheng Y M. Effect of stress concentration on mechanical properties of corroded reinforcing steel bars [J]. Journal of Southeast University:Natural Science, 2005, 35(6): 940-944.
- [16] Mohammad M, Kashani, Adam J. Use of a 3D optical measurement technique for stochastic corrosion pattern analysis of reinforcing bars subjected to accelerated corrosion[J]. Corrosion Science, 2013(73):208-221.

(编辑 胡玲)